Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 15, No. 2, 2025, p. 165-177

Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues

M. Teimorzadeh[1], J. Baradaran Motie[1*], A. Rohani[1], Y. Selahvarzi[2]

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: j.baradaran@um.ac.ir)

Received: 19 February 2023 Revised: 18 April 2023 Accepted: 20 April 2023 Available Online: 26 February 2025	**How to cite this article:** Teimorzadeh, M., Baradaran Motie, J., Rohani, A., & Selahvarzi, Y. (2025). Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues. *Journal of Agricultural Machinery*, *15*(2), 165-177. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150

Introduction

Neglecting the water requirements of trees can result in inefficient irrigation practices, leading to either water wastage or drought stress. Effective irrigation management necessitates precise information on the quantity and pattern of water consumption by trees. To achieve optimal irrigation, a reliable method for quantifying plant water needs is crucial, ensuring that trees avoid drought stress. Current methods for assessing tree water requirements often focus on specific components, such as stems or leaves. These techniques typically require manual intervention, which is time-consuming and resource-intensive, thereby restricting their application mainly to research environments.

Materials and Methods

A sap-flow meter device was developed to generate a heat pulse in a tree trunk at 15-minute intervals. The device comprises measuring probes, a processing unit, and a data logger. For a comprehensive evaluation, device probes were positioned on the trunk of a Ficus *benjamina* tree within a controlled environment at two distinct heights. The resulting sap flow through the vascular tissue was then compared to data obtained using the lysimetric method. The Ficus *benjamina* tree, with a trunk diameter of 3.5 cm and a height of 196 cm, was prepared during the summer of 2022. By measuring the rate of heat pulse dissipation and applying heat transfer principles, sap flow is estimated under the assumption that heat transfer occurs primarily through the sap flow within the vascular tissue. This estimation was achieved using the heat ratio method (HRM).

The trunk was triple drilled with holes of 1.5 mm in diameter and 25 mm in depth. Following drilling, the probes were inserted into these holes (Figure 1). To prevent heat transfer from the probes to the surrounding environment, the trunk was wrapped with glass wool insulation. To assess the reliability of the device, the lysimetric method was employed to measure tree transpiration. For this purpose, the soil surface of the pot was covered with cellophane to ensure that evaporation and weight loss of the pot occurred exclusively through the tree's leaves. Hourly measurements of the pot's weight were taken using a digital scale. Changes in the pot's weight indicate the amount of water evaporated, which corresponds to the water transpired by the tree through its vascular tissue.

Results and Discussion

The results showed that the sap-flow meter device slightly overestimates the tree's water consumption compared to the values obtained using the lysimetric method. Sap flow and transpiration follow a similar trend, both escalating throughout the day and reaching their highest levels in the early afternoon. This value reached

https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150

17.98 ml h^{-1} for sap flow and 16 ml h^{-1} for transpiration (by lysimetric method), followed by a rapid decrease in the late afternoon as the air cooled down. In addition, the results of device measurements showed that spraying water on the leaves lowers both the rate and volume of sap flow. When the canopy becomes wet, the evaporation of water from the leaf surface leads to a drop in the temperature, which in turn significantly slows down the flow of sap.

The v_1/v_2 ratio is not constant over time, making it crucial to choose the right starting point for measurements to ensure effective data acquisition during the device's operational cycle. It is essential to measure (by the device) the difference between temperature probes 40 seconds after heat pulse generation. The sap flow and transpiration followed a similar trend during the experiments. The sap flow and transpiration increased throughout the day, peaking in the early afternoon. On the first day, sap flow reached 17.98 ml h^{-1}, while the second day recorded an even higher rate of 19.75 ml h^{-1}. Correspondingly, the transpiration measured using the lysimetric method peaked at 16 ml h^{-1}, followed by a rapid decline in the late afternoon.

Conclusion

The results obtained from the developed device indicate several key findings. Sap flow and transpiration exhibit a similar trend during the test period, with the estimated sap flow value being approximately 30% higher than that obtained using the lysimetric method. The device effectively demonstrated the impact of surface irrigation; spray irrigation influences the sap flow rate such that when the canopy becomes wet, the sap flow rate decreases significantly. Additionally, sap flow and transpiration are positively correlated with air and canopy temperatures, and negatively correlated with relative humidity. Following calibration, the results show that the heat pulse method can accurately and effectively measure sap flow in the vascular tissue of trees.

Keywords: Heat ratio method, Lysimetric, Sap flow, Water tension

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱٤۰٤، ص ۱۷۷-۱٦۵

ساخت و ارزیابی عملکرد یک جریان‌سنج مبتنی بر پالس حرارتی برای اندازه‌گیری دبی شیره گیاهی در بافت‌های آوندی

مجید تیمورزاده[1]، جلال برادران مطیع[1*]، عباس روحانی[1]، یحیی سلاح ورزی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

چکیده

آبیاری دقیق درختان مستلزم در دسترس بودن اطلاعاتی از میزان و نحوه مصرف آب توسط آن‌ها است. عدم توجه به نیاز آبی درختان می‌تواند منجر به هدررفت آب و یا بروز تنش آبی در آن‌ها شود که می‌توان با به‌دست آوردن سرعت جریان شیره در بافت آوندی درخت مقدار آب مصرفی گیاه را تخمین زد. در این پژوهش، دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای مبتنی بر روش نسبت گرمایی قابل‌نصب بر روی تنه درختان ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه از بخش‌های کاوشگر اندازه‌گیری، واحد پردازنده داده و ثبت‌کننده داده تشکیل‌شده است. به‌منظور ارزیابی، کاوشگر بر روی تنه یک نمونه درخت فیکوس بنجامین در محیط کنترل‌شده دما و رطوبت، در دو ارتفاع متفاوت نصب شد. نتایج جریان شیره اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه با داده‌های به‌دست‌آمده از روش لایسیمتری مقایسه گردید. همچنین، اثرات روز و شب، مرطوب کردن سطح برگ و آبیاری در تغییرات جریان شیره بررسی شد. نتایج نشان داد دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای میزان مصرف آب درخت را نسبت به مقدار به‌دست‌آمده از روش لایسیمتری با ۳۰ درصد بیش برآوردی اندازه‌گیری می‌کند که این درصد اختلاف با کالیبره کردن دستگاه و اصلاح ضرایب اختصاصی درخت، قابل‌رفع می‌باشد. نمودار جریان شیره‌ای و تعرق از یک روند مشابه پیروی می‌کنند به‌طوری که در طول روز مقدار جریان شیره و تعرق افزایش‌یافته و در اواسط ظهر به اوج مقدار خود برای جریان شیره ۱۷/۹۸ml h^{-1} و برای تعرق ۱۶ml h^{-1} رسید و سپس در بعد از ظهر با خنک شدن هوا کاهش سریعی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، جریان شیره‌ای، روش نسبت گرمایی، لایسیمتری

مقدمه

تنش آبی در اثر کمبود آبیاری یا عدم دسترسی آب به گیاهان به‌وجود می‌آید. به عبارتی دیگر کم و زیاد شدن میزان آب می‌تواند بر تمامی فعالیت‌های گیاهان تأثیرگذار باشد و ساختار گیاهان را مورد تغییر قرار دهد. زمانی‌که آب کافی در دسترس درخت باشد، افزایش دما می‌تواند اثر مثبتی بر رشد درخت داشته باشد. زمانی که درخت در تنش آبی نیست حشرات و آفات اثر غیرقابل‌توجهی بر درختان دارند یا به‌طور کلی فاقد اثر مشخصی بر درختان هستند زیرا سیستم دفاعی درخت در برابر آفات با وجود تنش آبی تضعیف می‌گردد. همچنین افزایش دما و یا هجوم آفات وقتی با تنش آبی ترکیب شود، اثر چند برابری بر کاهش رشد درخت بر جا می‌گذارد که بیشتر از اثر تنش آبی و یا حمله حشرات به‌تنهایی است (Deihimfard, Mahallati, & Koocheki, 2015; Heidari, Omid, & Mohammadi, 2012; Kalankesh, Zazouli, Susanto, & Babanezhad, 2021).

یکی از اثرات سوء تنش آبی بر درختان و گیاهان، رشد ضعیف و کاهش باروری در آن‌ها می‌باشد. لذا لازم است تنش آبی در درختان به‌موقع تشخیص داده شده و آبیاری انجام شود. با وجود خشکسالی‌های پی در پی به منظور کاهش مصرف آب در بخش باغی، روش‌هایی با عنوان کم‌آبیاری، با اعمال سطح مشخصی از تنش آبی پیشنهاد می‌شود (Alizadeh, Toudeshki, Ehsani, Migliaccio, & Wang, 2021). مدیریت و کنترل دقیق سطح تنش آبی اعمال‌شده به گیاه، برای جلوگیری از افت شدید محصول، ضروری است. برنامه‌ریزی دقیق آبیاری می‌تواند ضمن حفظ آب در محصولات درختی، عملکرد را افزایش دهد. تنش آبی در درختان باعث کاهش فتوسنتز شده که خود موجب کاهش تعرق گیاه می‌گردد.

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: j.baradaran@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150

تنش شدید آبی می‌تواند باعث رشد محدود درختان و کاهش بهره‌وری در آن‌ها شود. علائم مهم تنش آبی گیاه تغییر رنگ شاخ و برگ به سبز و زرد روشن، ریزش برگ‌ها و ریزش گل‌ها و میوه‌ها می‌باشد (Alizadeh *et al.*, 2021).

عبور آب و مواد مغذی از بافت آوندی چوب[1] گیاه را جریان شیره گویند. سلامت گیاه و همچنین میزان فتوسنتز آن در ارتباط مستقیم با میزان تبخیر و تعرق می‌باشد، تبخیر و تعرق نیز مستلزم انتقال آب از طریق جریان شیره‌ای از سمت ریشه گیاه به سمت برگ‌ها است. روش‌های تعیین جریان شیره کاربردهای زیادی در کشاورزی، باغبانی و جنگل‌داری دارد که با به‌دست آوردن نرخ جریان شیره می‌توان برای تشخیص بحران تنش آبی در درختان تصمیم گرفت (Smith & Allen, 1996). کمّی کردن میزان جریان شیره در گیاهان چوبی و علفی به درک بهتر روابط آب و گیاه کمک می‌کند (Alizadeh *et al.*, 2021). الگوهای روزانه در مصرف آب باعث کوچک شدن قطر و تورم ساقه، روزنه‌های سطح برگ و میزان تبخیر سطحی برگ‌ها در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌شود که بر همین اساس روش‌های غیرمستقیمی شامل پرومتری، مخزن فشار و دندرومتر در بررسی تنش آبی استفاده می‌شود. روش پرومتری و مخزن فشار به دلیل داده‌برداری گسسته و نیاز به تهیه نمونه و فعالیتی محدود، پر هزینه نیازمند کالیبراسیون برای هر نمونه و تنها کاربرد تحقیقاتی دارند. دندرومترها ریز تغییرات در قطر ساقه ناشی از چرخه‌های انقباض و تورم را اندازه‌گیری می‌کنند که نشان‌دهنده تغییرات در محتوای آب گیاه است. همان‌طور که گیاهان تعرق می‌کنند، آب از ذخایر در بافت ریشه جمع‌آوری‌شده و از طریق بافت آوندی به برگ‌ها منتقل می‌شود. با این اتفاق، تنه یا ساقه منقبض می‌شود. هنگامی‌که تعرق کاهش می‌یابد یا متوقف می‌شود، آب همچنان از طریق سیستم ریشه وارد گیاه می‌شود (به شرطی که آب کافی در دسترس باشد) و با توزیع مجدد در گیاه باعث تورم بافت می‌شود. دندرومترها دستگاه‌های اندازه‌گیری نواری یا نقطه‌ای هستند. نوارهایی در اطراف محیط درخت پیچیده شده‌اند که انبساط و انقباض را از طریق حسگر موقعیت تشخیص می‌دهند. دستگاه‌های نقطه‌ای یک نقطه را روی سطح اندازه می‌گیرند (Ginestar & Castel, 1995). یک میله برای پایداری در مرکز تنه سوراخ می‌شود و میله دوم برای اندازه‌گیری در مقابل پوست قرار می‌گیرد. تفسیر داده‌های دندرومتر حداکثر انقباض روزانه[2] و سرعت رشد ساقه[3] متداول‌ترین معیارهایی هستند که استفاده می‌شوند. MDS میزان انقباض و انبساط ساقه را در یک چرخه ۲۴ ساعته اندازه‌گیری می‌کند. گیاهی که تحت تنش نباشد، MDS کمتری نسبت به گیاهی دارد که تحت تنش است، نمودارهای MDS میزان رطوبت از دست‌رفته (تعرق) و همچنین میزان بازیابی (از آب موجود در ناحیه ریشه) اندازه‌گیری می‌کند همچنین SGR میزان رشد ساقه را از طریق چرخه انقباض و انبساط (۲۴ ساعته) اندازه‌گیری می‌کند (Fernández & Cuevas, 2010). کواچووا و همکاران (Kováčová, Bárek, & Kišš, 2020) تاثیر فیزیولوژیکی تنش آبی در گل آفتابگردان و ذرت با تغییرات دندرولوژیکی گیاه را بررسی کردند. در این پروژه دندرومترهای خودکار نصب و اثر دو دوز آبیاری ۵ میلی‌متر در روز و ۵ میلی‌متر در فاصله ۳روزه بر رشد آفتابگردان و ذرت در شرایط آزمایشگاهی بررسی گردید. مقایسه آفتابگردان و ذرت آبیاری‌شده در فواصل مختلف نشان داد که قطر ساقه‌ها در آبیاری یک روزه در مقایسه با ۳ روز به میزان ۰/۸ میلی‌متر (آفتابگردان) و ۱۲ میلی‌متر (ذرت) افزایش یافته است و نتیجه گرفتند که در طول آبیاری ۳روزه چروکیدگی بیشتر ساقه‌ها رخ داده که نشان‌دهنده شروع تنش آبی برای محصولات زراعی است.

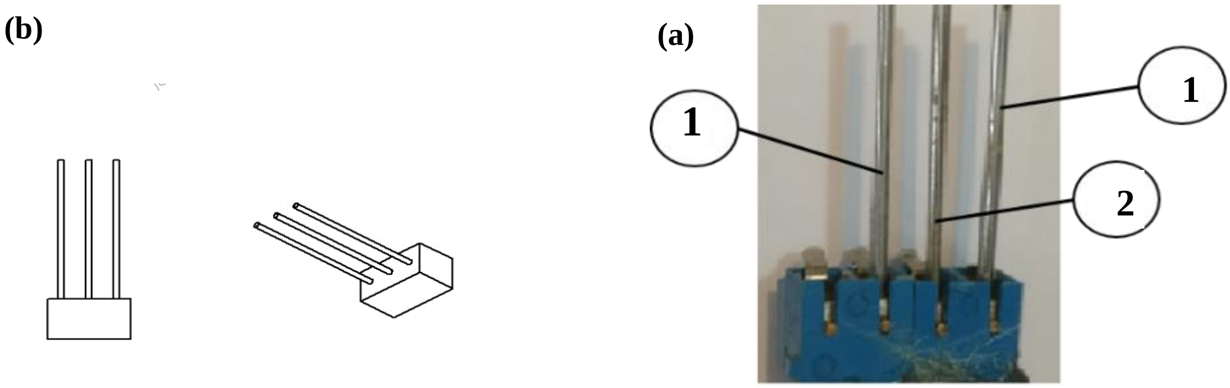
با فرض این‌که نرخ انتقال گرما بین دونقطه در بافت آوندی درخت متناسب با نرخ جریان شیره‌ای می‌باشد (Burgess & Downey, 2018) این پژوهش با هدف تعیین مقدار جریان شیره‌ای در بافت آوندی درختان به روش پالس حرارتی انجام شد. ازجمله معایب عموم روش‌های اندازه‌گیری تنش آبی گیاهان کالیبراسیون روزانه برای هر درخت است. با توجه به معایب روش‌های گفته‌شده روش پالس حرارتی می‌تواند مناسب‌ترین روش برای پایش مداوم وضعیت نیاز آبی درختان انتخاب شود. همچنین با توجه به گران بودن دستگاه اندازه‌گیری جریان شیره[4] در درختان و نبود نمونه داخلی، در این پژوهش اقدام به ساخت و ارزیابی نمونه بومی این دستگاه شد. با استفاده از این دستگاه می‌توان، جریان شیره را به‌عنوان شاخص تعرق معرفی کرد و با اندازه‌گیری آن، وضعیت تنش آبی درخت را به‌طور پیوسته در تمام طول ۲۴ ساعت بررسی و به مدیریت آبیاری بهتر درختان کمک کرد.

مواد و روش‌ها

اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای

دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای ساخته‌شده شامل مجموعه‌ای از سه کاوشگر[5] اندازه‌گیری، واحد پردازش الکترونیکی و یک ثبت‌کننده داده می‌باشد. کاوشگر شامل سه بخش به طول ۳۵ میلی‌متر است که درون غلاف های از جنس فولاد ضدزنگ (استیل) به قطر ۱/۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این مجموعه شامل دو کاوشگر اندازه‌گیری دما (شکل ۱-a) و یک کاوشگر گرم‌کن (شکل ۱-b) است.

1- Sap wood
2- Maximum Daily Shrinkage (MDS)
3- Stem Growth Rate (SGR)
4- Sap-flow meter
5- Probe



شکل ۱– (a) مجموعه کاوشگرها، ۱) ترموکوپل، ۲) گرم‌کن (b) شماتیکی از مجموعه کاوشگرها در نماهای متفاوت

Fig. 1. (a) The set of probes 1) thermocouples and 2) heater, and (b) the schematic of probes from different angles (values are in millimeters)

برای ایجاد انرژی گرمایی لازم جهت افزایش دمای بافت آوندی به میزان ۲ درجه سلسیوس (Burgess & Downey, 2018)، در المان حرارتی از رشته سیم نیکل کروم به طول ۷۰ میلی‌متر در یک غلاف استیل به قطر ۱/۵ میلی‌متر استفاده شد. گرم‌کن به‌گونه‌ای طراحی‌شده‌اند که با مقدار مقاومت ۱۵ اهم با ولتاژ ۱۲ ولت به مدت ۲ تا ۸ ثانیه تغذیه می‌شود و توانی به‌اندازه ۹/۶ وات ایجاد می‌کند. عموماً گرم‌کن‌ها به علت سایش و پارگی ناشی از گرما و سرمایش مکرر عمری محدود و غیرقابل‌پیش‌بینی دارند که برای برطرف کردن این مشکل و افزایش دوام گرم‌کن، سیم‌های گرم‌کن داخل غلاف فلزی قرار داده شد و با نوعی گچ مخصوص درون این غلاف فلزی محکم گردید. کاوشگرهای اندازه‌گیری دما شامل ترموکوپل نوع K می‌باشند و به‌طور مشابه درون غلاف استیل به قطر ۱/۵ میلی‌متر نصب شدند که جهت اندازه‌گیری دمای بالادست و پایین‌دست جریان شیره پس از اعمال پالس حرارتی استفاده می‌شوند. در شکل ۱ تصویر این کاوشگرها به شکل یک مجموعه سه عددی مشاهده می‌شود.

ثبت‌کننده داده[1]

در دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای از یک برد آردینو[2] مدل UNO R3 به‌عنوان پردازنده و ثبت‌کننده داده استفاده‌شد. برد آردینو یک برد متن‌باز مبتنی بر میکروکنترلر AVR است که مجهز به مجموعه‌ای از پین‌های ورودی و خروجی دیجیتال و آنالوگ می‌باشد. این برد با استفاده از نرم‌افزار Arduino IDE از طریق کابل USB قابل‌برنامه‌ریزی است. این برد ولتاژ بین ۵ تا ۲۰ را می‌تواند به‌عنوان ورودی استفاده کند زیرا دارای یک رگلاتور داخلی برای تبدیل ولتاژ است. در این دستگاه برد پردازنده و ثبت‌کننده توسط کابل USB و یا منبع تغذیه داخلی دستگاه راه‌اندازی می‌شود. ولتاژ ورودی تغذیه برد از یک منبع تغذیه سوئیچینگ ۱۲ ولت ۵ آمپر مدل BS-037 برای تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت برق شهری به ۱۲ ولت تامین شد. داده‌های اندازه‌گیری‌شده شامل دما هر کاوشگر، زمان و سرعت و دبی جریان شیره به‌طور مداوم روی یک کارت میکرو اس دی[3] ۸ گیگابایتی ذخیره می‌شود. پردازنده دستگاه داده‌های دریافتی از کاوشگرها را که پس از ایجاد پالس گرمایی کوتاه‌مدت ایجادشده‌اند به روش نسبت گرمایی مورد تحلیل قرار داده و سرعت جریان شیره و دبی جریان حجمی شیره در بافت آوندی را محاسبه می‌کند. روش نسبت گرمایی اصلاح‌شده روش پالس حرارت جبرانی است (Burgess & Downey, 2018). با اندازه‌گیری نسبت گرمای منتقل‌شده بین دو حس‌گر دما که به‌طور متقارن نسبت به گرم‌کن قرارگرفته‌اند، مقدار و جهت شار آب به‌دست می‌آید (Burgess & Downey, 2018). کاوشگرهای دستگاه می‌توانند بر روی تنه‌های چوبی با قطر بیشتر از ۳۰ میلی‌متر نصب شوند.

اندازه‌گیری و محاسبه سرعت پالس حرارتی

روش نسبت گرما، نسبت افزایش دما را به دنبال انتشار یک پالس گرما که در نقاطی از پایین‌دست و بالادست یک گرم‌کن فاصله‌دارند را اندازه‌گیری می‌کند که از رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌شود (Burgess & Downey, 2018).

1- Data logger
2- Arduino
3- Micro SD

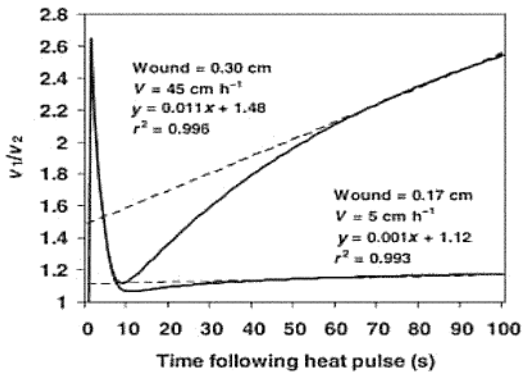
$$v_h = \frac{k}{x}\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)3600 \qquad (۱)$$

این رابطه اولین بار توسط مارشال (Marshall, 1958) بیان شد و در آن v_h سرعت پالس حرارتی ($cm\ h^{-1}$)، k انتشار حرارتی در راستای الیاف چوب برحسب $cm^2\ s^{-1}$ و x فاصله بین گرم‌کن با هریک از کاوشگرهای دما برحسب cm است. v_1 و v_2 برحسب درجه سانتی‌گراد، افزایش دما (از دمای اولیه) در نقاط پایین‌دست و بالادست است که به فاصله برابر x سانتی‌متر از گرم‌کن می‌باشد. با توجه به فاصله ۰/۶ سانتی‌متری موقعیت کاوشگرهای دما نسبت به کاوشگر گرم‌کن، مقدار x= ۰/۶ سانتی‌متر و مقدار توصیه‌شده برای ضریب انتشار حرارتی $k = ۰/۰۰۲۵ cm^2\ s^{-1}$ است.

تأثیر زمان اندازه‌گیری

روند و مسیر انتقال حرارت در درخت با مسدود کردن و آسیب به آوندهای چوبی ناشی از قرار دادن کاوشگرها تغییر می‌کند. همچنین آشفتگی و برهم خوردن روند در انتقال حرارت نیز رخ می‌دهد که علت آن این است که خواص حرارتی مواد حسگر با چوب متفاوت است. با قرار دادن دقیق کاوشگرها در تنه درخت این احتمال وجود دارد که فاصله کاوشگرها حداقل کمی نامتقارن باشد و باعث می‌شود که نسبت v_1/v_2 با زمان تغییر کند. در نتیجه زمان اندازه‌گیری بر نتایج حاصله تأثیر می‌گذارد. شکل ۲ نشان می‌دهد که نرخ تغییر نسبت v_1/v_2 بصورت تصاعدی با زمان (پس از پالس گرما) کاهش می‌یابد و نسبت‌های v_1/v_2 بصورت مجانبی به مقدار ایده‌آل نزدیک می‌شود (Burgess & Downey, 2018).

با توجه به پیش آزمون‌هایی که انجام شد نسبت v_1/v_2 در این نمونه درخت تقریباً بعد ۴۰ الی ۱۰۰ ثانیه خطی است و در این آزمایش قرائت داده‌ها بعد از ۴۰ ثانیه انجام شد. برای این‌که سهم هر نویز سیگنال تصادفی در این آزمایش را به حداقل برسانیم در فاصله ۴۰تا ۴۶ ثانیه بعد از خاموش شدن گرم‌کن داده‌ها هر ۰/۲ ثانیه قرائت کرده و در بازه های ۱ ثانیه ای میانگین گرفته شد.



شکل ۲– تغییرات مدل‌شده در نسبت‌های v_1/v_2 با گذشت زمان

Fig.2. The modeled changes in v_1/v_2 ratios over time (Burgess & Downey, 2018)

تئوری اصلاح زخم

نصب کاوشگرها در بافت آوند چوبی باعث آسیب مکانیکی قابل‌توجهی می‌شود. علاوه بر قطع شدن مسیرهای جریان، مسیرهای دست‌نخورده هم ممکن است مسدود شوند، زیرا گیاه با تشکیل تایلوزها[1] به زخم پاسخ می‌دهد. ناحیه حاصل از چوب نارسانا در اطراف محل کاوشگر بر اندازه‌گیری v_h با کاهش v_1/v_2 تأثیر می‌گذارد و رابطه (۲) برای v_h اصلاح می‌شود (Burgess & Downey, 2018).

$$v_c = bv_h + cv_h^2 + dv_h^3 \qquad (۲)$$

که در آن v_c سرعت پالس حرارتی اصلاح‌شده ($cm\ h^{-1}$)، b، c و d ضرایبی هستند که می‌توان از جدول ۱ به‌دست آورد. مقدار دقیق قطر زخم یا قطر تایلوز پس از پایان آزمایشات با قطع تنه اندازه‌گیری شد.

۱– تایلوز یک سلول پارانشیمی بادکنکی شکلی است که از طریق منافذ سطح غشا به درون آوند راه می‌یابد و باعث کاهش هدایت آب در گیاه می‌شود.

جدول ۱– ضرایب تصحیح برای اثر تایلوزها

Table 1- Correction factor for the effect of tyloses (Burgess & Downey, 2018)

قطر زخم (سانتی‌متر) Wound diameter (cm)	b	c	d
0.17	1.6565	-0.0014	0.0002
0.18	1.7070	-0.0014	0.0002
0.19	1.7701	-0.0017	0.0002
0.2	1.8292	-0.0019	0.0003
0.21	1.8909	-0.0022	0.0003
0.22	1.9554	-0.0025	0.0004
0.23	2.0226	-0.0029	0.0004
0.24	2.0685	-0.0031	0.0005
0.26	2.1932	-0.0038	0.0006
0.28	2.3448	-0.0047	0.0008
0.3	2.4908	-0.0057	0.001

تعیین سرعت شیره

فقط بخشی از بافت آوند چوبی حاوی شیره متحرک است. کاوشگرهای پالس حرارتی به‌طور مؤثر میانگین وزنی سرعت شیره متحرک و چوب را اندازه‌گیری می‌کنند. سرعت شیره را می‌توان با اندازه‌گیری بخش‌های شیره و چوب در آوند چوبی و محاسبه چگالی‌های متفاوت و ظرفیت‌های حرارتی ویژه آن‌ها بر اساس مقادیر واقعی از رابطه (۳) تعیین کرد (Burgess & Downey, 2018).

$$v_s = \frac{v_c \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \qquad (۳)$$

که در این رابطه v_s سرعت جریان شیره $(cm\ h^{-1})$، ρ_b چگالی چوب (چگالی بر پایه وزن خشک)، c_w و c_s به‌ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه ماتریس چوب $J\ kg^{-1}$ ۱۲۰۰ در ۲۰ درجه سانتی‌گراد و جریان شیره $J\ kg^{-1}$ ۴۱۸۲ در ۲۰ درجه سانتی‌گراد، m_c محتوای آب چوب ρ_s، چگالی آب و v_s سرعت جریان شیره $(cm\ h^{-1})$ است. همچنین جریان حجمی را می‌توان به‌راحتی به‌عنوان حاصل‌ضرب سرعت شیره و سطح مقطع قسمت بافت آوندی به‌دست آورد (رابطه ۴). چگالی چوب و محتوای آب چوب پس از پایان دوره آزمایش با قطع درخت و تهیه نمونه چوب در آزمایشگاه به‌ترتیب به روش غوطه‌وری و خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد.

$$Q = v_s A \qquad (۴)$$

که در آن: v_s سرعت جریان شیره $(cm\ h^{-1})$، A سطح مقطع بافت آوندی (cm^2) و Q جریان حجمی عبوری $(cm^3\ h^{-1})$ از درخت است.

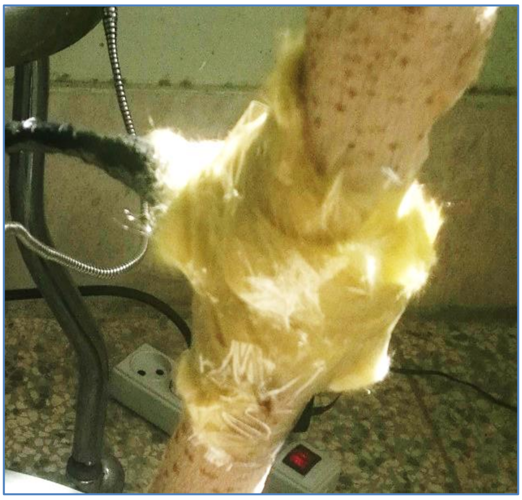
آماده‌سازی نمونه

گیاه فیکوس بنجامین (*Ficus Benjamina*) رقم وندی[1] و میانگین قطر تنه ۳/۵ سانتی‌متر با ارتفاع ۱۹۶سانتی‌متر از گلخانه گروه باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در تابستان ۱۴۰۱ تهیه گردید. به‌منظور نصب دستگاه بر روی تنه درخت از یک صفحه تفلونی با سه سوراخ به فاصله ۰/۶ سانتی‌متر به‌عنوان شابلون سوراخ‌کاری استفاده شد و تنه توسط مته‌ای به قطر ۱/۵ میلی‌متر به اندازه طول کاوشگرها سوراخ گردید. بعد از سوراخ‌کاری، کاوشگرها توسط مقدار اندکی گریس چرب شد تا راحت‌تر وارد سوراخ‌ها شده و تنشی به بافت آوند وارد نکند. برای حذف هرگونه تبادل گرمایی بین کاوشگرها و محیط اطراف به‌منظور حداقل رساندن خطا، بخش محل نصب کاوشگرها توسط پشم شیشه عایق شد (شکل ۳). اعتبارسنجی نتایج جریان شیره و دبی حجمی با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج روش لایسیمتری انجام شد. در این روش تغییرات وزن گلدان حاوی درخت فیکوس بنجامین در طول دوره آزمون توسط ترازوی دیجیتال مدل ACS-30-JC31 ساخت کشور چین با دقت ۱ گرم قرار گرفت و به فاصله زمانی هر یک ساعت گلدان وزن شد تا تغییرات آب گیاه که از طریق تبخیر و تعرق از برگ‌های درخت با محیط انجام می‌شود را اندازه بگیرد. بدین منظور ابتدا سطح خاک گلدان توسط سلفون کامل پوشانده شد تا از سطح خاک با محیط هیچ‌گونه تبخیری صوت نگیرد و فقط تغییرات وزن، ناشی تبخیر از برگ‌های درخت باشد (Uddin, Smith, Hancock, & Foley, 2014).

دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای به قسمتی از تنه درخت وصل شد و شروع به داده‌برداری کرد این آزمایش در دو ارتفاع در قسمت‌های مختلف تنه انجام گردید و در هر بار به مدت ۴۸ ساعت توسط دستگاه به فاصله زمانی ۱۵ دقیقه یک‌بار سرعت پالس گرما ایجاد و داده ها ثبت گردید. اندازه‌گیری مستمر وزن درخت جهت تعیین میزان تبخیر به روش لایسیمتری انجام گرفت. سپس سرعت پالس حرارتی طبق رابطه‌های (۳) و (۴) به‌سرعت شیره و جریان شیره تبدیل شدند. به‌منظور آبیاری گلدان از روش قطره‌ای به زیر سلفون از طریق یک شلنگ انعطاف‌پذیر آب وارد شد.

1- Wiandi





شکل ۳- عایق‌کاری محل اتصال کاوشگرها توسط پشم‌شیشه
Fig.3. Glass wool insulation at the connection point of the probes with the tree

نتایج و بحث

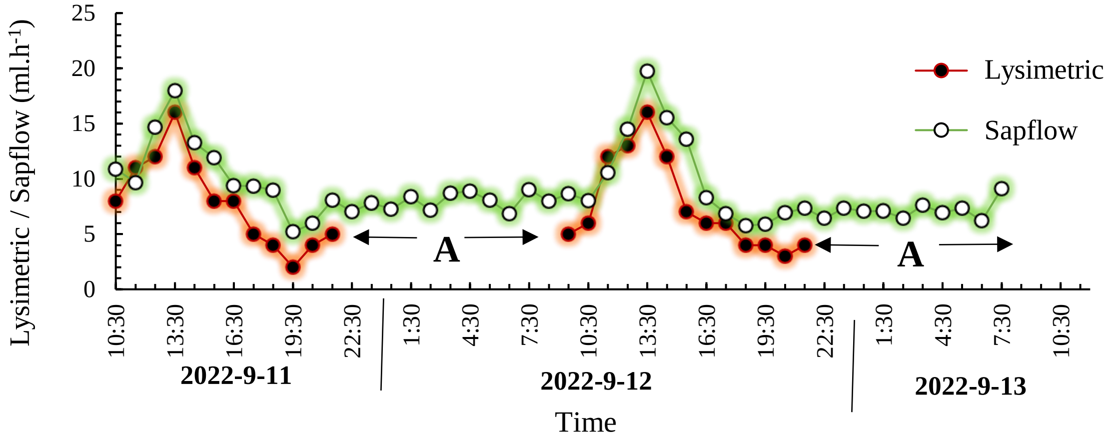
الگوی روزانه جریان شیره‌ای و تعرق (لایسیمتری)

الگوی روزانه یک‌ساعته جریان شیره‌ای (دستگاه جریان‌سنج) و تعرق (روش لایسیمتری) در درخت فیکوس بنجامین در شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. مطابق با این شکل‌ها، جریان شیره‌ای و تعرق از یک‌روند مشابه در طول دوره داده‌برداری پیروی می‌کنند به‌طوری‌که جریان شیره‌ای و تعرق در طول روز افزایش‌یافته و در اواسط ظهر به اوج مقدار خود می‌رسد. جریان شیره در روز اول (۱۴۰۱/۶/۲۰) برابر با ۱۷/۹۸ ml h^{-1} و در روز دوم (۱۴۰۱/۶/۲۱) ۱۹/۷۵ ml h^{-1} اندازه‌گیری شد. همچنین میزان تعرق به روش لایسیمتری در هر دو روز به مقدار ۱۶ ml h^{-1} رسید و به دنبال آن در اواخر بعدازظهر کاهش سریعی داشته است. داده‌برداری برای تعرق در طول شب انجام نشد که به‌صورت گسستگی در نمودار دیده می‌شود (شکل ۴). شکل ۵ مقایسه جریان شیره و تعرق در ارتفاعی بالاتر از آزمایش اول است. همچنین این نمودار داری دو قله می‌باشد به‌طوری‌که قله تشکیل‌شده در روز ۱۴۰۱/۶/۲۹ (شکل ۵) بزرگ‌تر از قله تشکیل‌شده از قله در روز ۱۴۰۱/۶/۲۸(شکل ۶) می‌باشد این اختلاف به این دلیل است که در روز ۱۴۰۱/۶/۲۹ درخت توسط آبیاری قطره‌ای آبیاری شده است و مقدار آب کافی برای تعرق داشته است. همچنین مقدار جریان شیره تخمین زده از مقداری واقعی کمی بیشتر است که این اختلاف به‌خاطر این است که جریان شیره‌ای در راستای شعاعی آوندهای چوبی یکنواخت نیست. مقدار جریان شیره از مقداری نزدیک به صفر در ناحیه پوست درخت شروع شده و حداکثر آن در حلقه آوندهای جدید می‌باشد، این مقدار به سمت مرکز تنه مجدد به صفر میل می‌کند. در این پژوهش محل قرارگیری حسگر دماسنج در بخشی قرار می‌گیرد که حداکثر نرخ جریان شیره را می‌سنجد. لذا به دلیل این‌که روش نسبت گرمایی نرخ شعاعی جریان شیره ثابت فرض می‌شود، این اتفاق موجب بیش‌برآوردی نسبت به مقدار لایسیمتر می‌شود. دوگاس (Dugas, 1990) ضمن مقایسه جریان شیره در ساقه گیاه پنبه به روش پالس حرارتی جبرانی و روش لایسمتری در گلخانه نتایج مشابهی درخصوص افزایش میزان جریان شیره در طول روز و همچنین اختلاف جزئی بین دو روش اندازه‌گیری را گزارش کرد. برجس و همکاران (Burgess *et al.*, 2001) با انجام روش مشابه (روش HRM) بروی درخت اکالیپتوس مارجیناتا[1] به نتایج مشابهی رسیدند.

شکل ۶ سرعت پالس حرارتی در تنه درخت را در فاصله زمانی هر ۱۵ دقیقه نشان می‌دهد. تغییرات بدین گونه است که از یک‌روند مشابه در طول دوره (روز اول و دوم) پیروی می‌کند به‌گونه‌ای که سرعت پالس حرارتی در طول روز افزایش یافته و تا اواسط ظهر به بیشترین مقدار خود در روز ۲۰/ ۱۴۰۱/۶، ۷/۲۱ $cm\ h^{-1}$ و روز ۶/۲۱، ۷/۸۱ $cm\ h^{-1}$ رسیده و به دنبال آن در اواخر بعدازظهر کاهش پیدا می‌کند. یکی از نقاط قوت این روش نسبت به سایر روش‌هایی مانند پالس حرارتی جبرانی، بهبود محدوده اندازه‌گیری (جریان‌های کم و

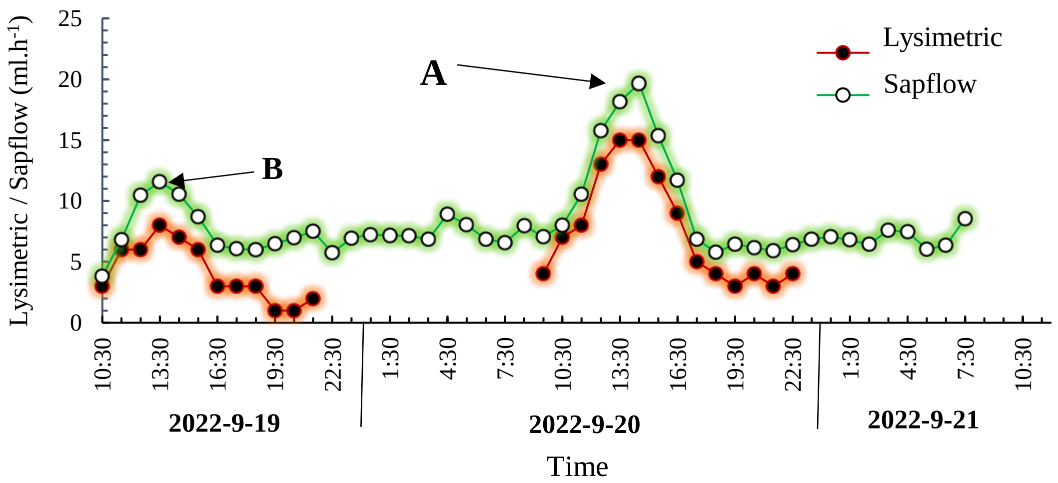
1- Eucalyptus marginata

معکوس می‌باشد (Burgess *et al.*, 2001). در شکل ۶ نقاط A و B محدوده‌هایی است که در شب مقدار سرعت پالس حرارتی منفی شده است و جریان معکوس‌شده را نشان می‌دهد. این بـدین معناسـت کـه جهت شار جریان از سمت تنه به ریشه می‌باشد. البته مقدار منفی هـم می‌تواند در روز نمایان شود به شرطی که درخت تحت تنش آبی باشد تا روزنه‌های برگ مسدود شود و از تبخیر آب از سطح برگ جلوگیری کند.



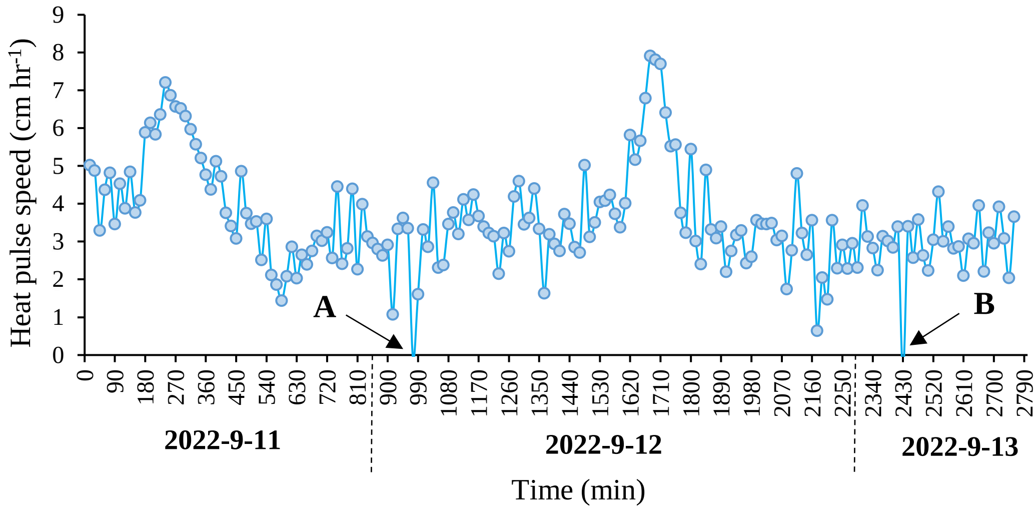
شکل ٤– الگوی روزانه جریان شیره‌ای اندازه‌گیری‌شده به روش نسبت گرمایی (HRM) و اندازه‌گیری لایسیمتری در بازه زمانی یک‌ساعته و بازه‌ی A نبوده داده در زمان شب به علت عدم دسترسی به آزمایشگاه

Fig.4. The daily pattern of the sap flow measured by HRM and lysimetric measurement in a one-hour period; no lysimetric measurements for periods marked with A were recorded due to lack of access to the laboratory at night



شکل ۵– الگوی روزانه جریان شیره‌ای اندازه‌گیری‌شده به روش نسبت گرمایی (HRM) و اندازه‌گیری لایسیمتری در بازه زمانی یک‌ساعته در ارتفاع نصب بالاتر روی تنه درخت، A و B اوج جریان شیره.

Fig.5. Daily pattern of sap flow, measured hourly using the HRM method and lysimetric measurement at higher installation place, A and B mark peak sap flow.



شکل ٦- الگوی تغییرات سرعت پالس حرارتی به روش نسبت گرمایی (HRM) در درخت فیکوس بنجامین در بازه زمانی ۱۵ دقیقه، A و B نقاطی که جریان شیره‌ای معکوس‌شده

Fig.6. The pattern of changes in the speed of the thermal pulse by the heat ratio method (HRM) in the Ficus Benjamina tree in a period of 15 minutes; A and B are the points where the sap flow is reversed

تأثیر زمان ثبت داده‌های دما

شکل ۷ تغییرات نسبت v_1/v_2 را به زمان بعد از آزادسازی پالس حرارتی نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتایج زیر را به‌دست آورد. نرخ تغییر در نسبت v_1/v_2 بعد از ۴۰ ثانیه بسیار کوچک می‌شود و روند نسبت v_1/v_2 به‌طور خطی خواهد بود. همچنین حداقل بعد از ۴۰ ثانیه بعد از آزادسازی پالس حرارتی اندازه‌گیری‌ها می‌توانند انجام شود. چراکه الگوی انتقال حرارت با مسدود کردن و آسیب به آوندهای چوبی ناشی از قرار دادن کاوشگرها تغییر می‌کند. اختلال اضافی در انتقال حرارت به‌خاطر متفاوت بودن خواص حرارتی مواد حسگر (جنس استیل) و چوب می‌باشد درنتیجه برای انتقال حرارت به حسگرها نیاز به زمان بیشتری است. برای این‌که سهم هر نویز از سیگنال تصادفی در اندازه‌گیری‌ها کم شود میانگین چند داده بعد از زمان ۴۰ ثانیه انجام ثبت شد. همچنین برجس و همکاران نتایج مشابه در مورد اهمیت زمان اندازه‌گیری گزارش کردند (Burgess *et al.*, 2001).

اثر آزاد شدن انرژی پالس حرارتی بروی دمای جریان شیره‌ای

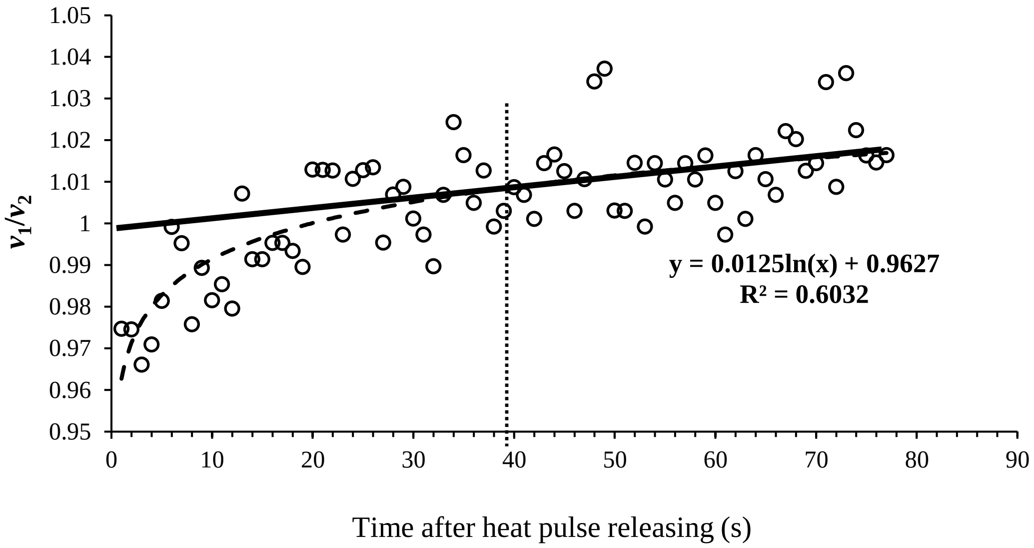
حداقل افزایش دما در اطراف کاوشگرها برای روش نسبت گرمایی ۰/۵ درجه سانتی‌گراد است (Burgess & Downey, 2018). شکل ۸ نمودار دمای ترموکوپل پایین دست جریان (از نظر ارتفاع ترموکوپل بالا) را در بازه زمانی دوساعته نمایش می‌دهد. بعد از روشن شدن گرم‌کن دمای جریان شیره حدود ۱الی ۲ درجه افزایش و به اوج خود می‌رسد و در انتها بعد حدود ۱۵ دقیقه به دمای اولیه خود باز می‌گردد.

یکی از علل انتخاب دوره زمانی داده‌برداری در هر ۱۵ دقیقه این است که در طول این ۱۵ دقیقه گرمای افزایش‌یافته به دمای اولیه خود باز می‌گردد و هیچ گرمای مانده در چوب اطراف کاوشگرها باقی نمی‌ماند تا باعث ایجاد خطا در آزمایش گردد. نکته دیگری که در شکل ۸ به‌خوبی قابل نمایش نیست و می‌توان رسم نمودار دمای ترموکوپل پایین‌دست در دوره زمانی یک ثانیه در یک بازه زمانی یک‌ساعته (شکل ۹) به آن پی برد، این است که زمانی‌که گرم‌کن روشن می‌شود و تا پایان خاموش شدن گرم‌کن دمای حس‌شده توسط ترموکوپل کاهش می‌یابد و افزایش دما بعد از خاموش شدن گرم‌کن می‌باشد (شکل ۹). دلیل این امر می‌تواند این باشد که زمانی که گرم‌کن روشن می‌شود باعث ایجاد یک شوک به جریان شده و جریان با سرعت بیشتری به سمت برگ‌ها می‌رود و جریان خنک‌تر وارد محدوده کاوشگرها شده و دمای ترموکوپل‌ها را کاهش می‌دهد.

اثر خیس شدن تاج‌پوش بر جریان شیره

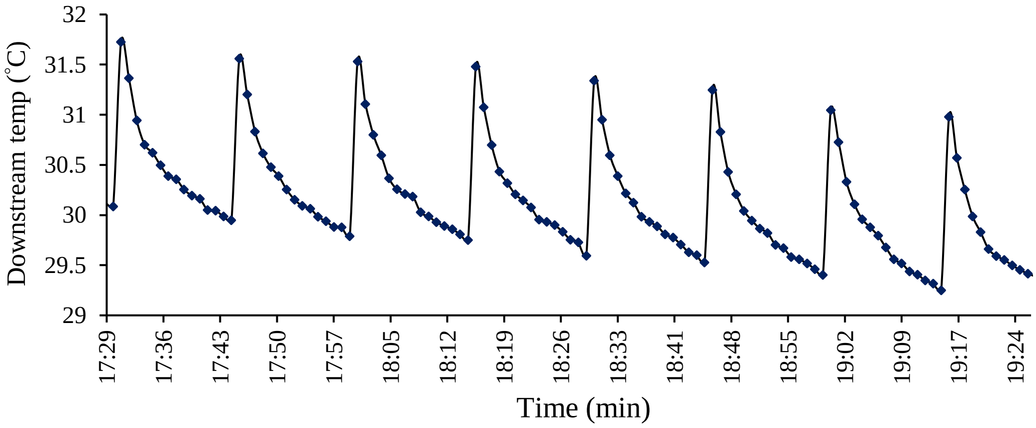
در طول آزمایش در ساعت‌های ۱۳:۳۰ هرروز تاج‌پوش درخت (در آزماش اول) توسط اسپری آبیاری شد. این نوع آبیاری بر سرعت جریان شیره تأثیر می‌گذارد به‌طوری‌که با خیس شدن تاج‌پوش تبخیر آب از سطح برگ از همان آب سطحی صورت می‌گیرد و سرعت

جریان شیره کاهش محسوسی پیدا می‌کند. در شکل ۱۰، نقاط A و B زمان‌های آبیاری می‌باشد. در نقاط A و B که تاج‌پوش آبیـاری شـده، شیب روند کاهش بیشتری پیداکرده (مقدار جریـان کاهش‌یافتـه) و در ساعت بعد به روند خود برگشته است.



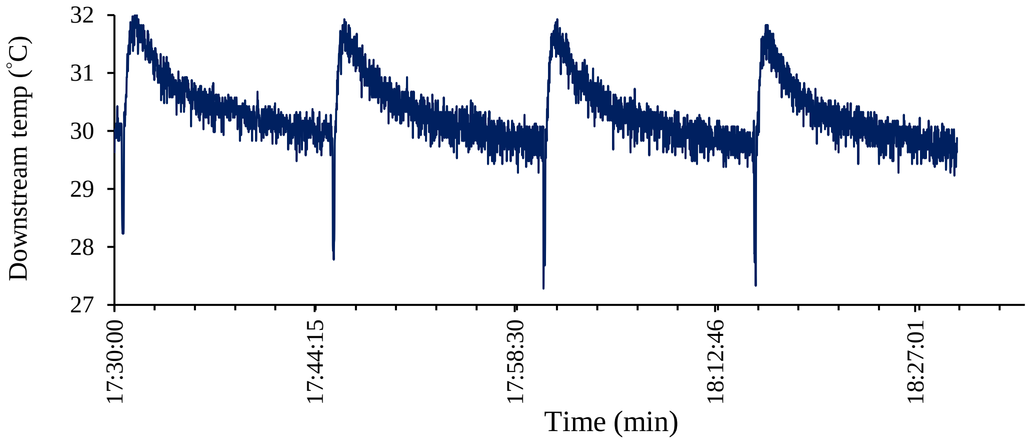
شکل ۷– تغییرات نسبت v_1/v_2 به روش نسبت گرمایی (HRM) برای درخت فیکوس بنجامین با عرض زخم ۰/۲۱ سانتی‌متر در زمان بعد از آزاد شدن پالس حرارتی

Fig.7. Changes in the v1/v2 ratio by the heat ratio method (HRM) for the Ficus Benjamina tree with a wound width of 0.21 cm in the time after the release of the thermal pulse



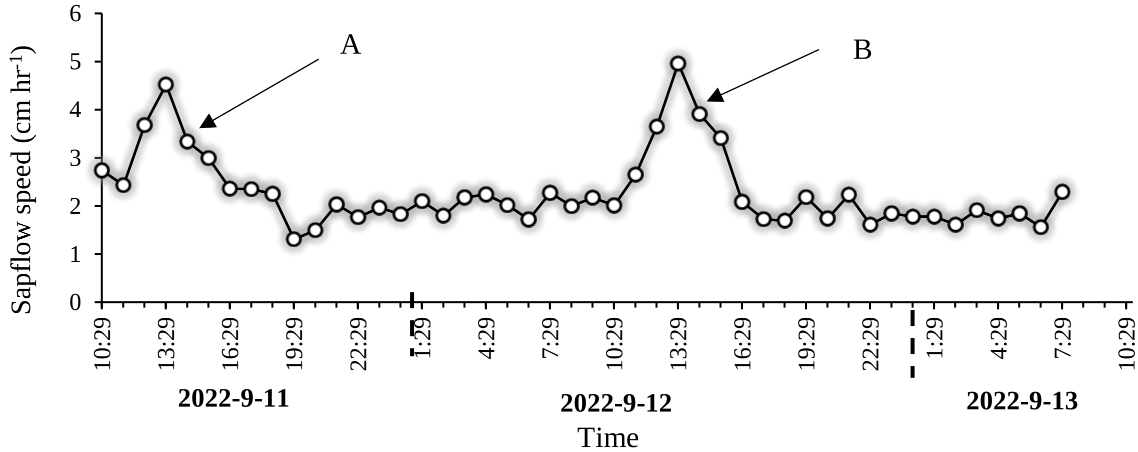
شکل ۸– نمودار دمای دماسنج پایین‌دست در یک بازه زمانی دوساعته در روز اول (۱۴۰۱/۶/۲۰)

Fig.8. Temperature graph of downstream thermometer over a two-hour period on the first day (September 11, 2022)



شکل ۹– تغییرات دمای دماسنج پایین‌دست در بازه یک‌ساعته با دوره یک ثانیه

Fig.9. Temperature of the downstream thermometer over a one-hour period with one-second intervals between the readings



شکل ۱۰– الگوی سرعت جریان شیره با دوره یک‌ساعته در بازه، A و B اثر آبیاری پاششی تاج‌پوش

Fig.10. Sap flow rate pattern with hourly readings, with A and B showing the effect of water moisture on the leaves

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، موارد زیر از دستگاه ساخته‌شده استنتاج می‌شود، جریان شیره‌ای و تعرق از یک‌روند مشابه در طول دوره آزمایش پیروی می‌کنند و مقدار جریان شیره تخمین‌زده از مقدار واقعی به دلیل یکنواخت فرض کردن سرعت شیره در راستای شعاعی تنه، کمی بیشتر است. محدوده‌هایی که در شب مقدار سرعت پالس حرارتی منفی شده است و جریان معکوس شده، بدین معناست که جهت شار جریان شیره از سمت تنه به ریشه می‌باشد که در اثر بسته شدن روزنه‌های برگ و عدم مکش شیره از سمت تاج پوش است. همچنین زمانی‌که گرم‌کن روشن می‌شود و تا پایان خاموش شدن گرم‌کن دمای حس‌شده توسط ترموکوپل کاهش می‌یابد و افزایش دما بعد از خاموش شدن گرم‌کن می‌باشد.

دستگاه توانست اثر آبیاری سطحی را به‌خوبی نشان دهد، آبیاری توسط اسپری بر سرعت جریان شیره تأثیر می‌گذارد به‌طوری‌که با خیس شدن تاج‌پوش تبخیر آب از سطح برگ از همان آب اسپری شده است و سرعت جریان شیره کاهش محسوسی پیدا می‌کند. جریان شیره و تعرق با دمای هوا، دمای تاج‌پوش نسبت مستقیم و با رطوبت نسبی نسبت معکوس دارد.

مشارکت نویسندگان

مجید تیمورزاده: جمع‌آوری داده، پردازش داده، استخراج متن اولیه
جلال برادران مطیع: نظارت و مدیریت، مفهوم‌شناسی، تحلیل

آماری، ویرایش متن، اعتبارسنجی

عبـاس روحـانی: مفهوم‌شناسـی، تحلیـل آمـاری، اعتبارسـنجی، ویرایش متن

یحیی سـلاح ورزی: روش‌شناسـی، مشـاوره فنـی، اعتبارسـنجی، ویرایش متن

References

1. Alizadeh, A., Toudeshki, A., Ehsani, R., Migliaccio, K., & Wang, D. (2021). Detecting tree water stress using a trunk relative water content measurement sensor. *Smart Agricultural Technology*, *1*, 100003. https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100003
2. Burgess, S., & Downey, A. (2018). SFM1 Sap Flow Meter Manual version 5. ICT International Pty Ltd, Australia.
3. Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., & Bleby, T. M. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, *21*(9), 589-598. https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.589
4. Deihimfard, R., Mahallati, M. N., & Koocheki, A. (2015). Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling. *Field Crops Research*, *184*, 28-38. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.002
5. Dugas, W. A. (1990). Comparative measurement of stem flow and transpiration in cotton. *Theoretical and Applied Climatology*, *42*, 215-221. https://doi.org/10.1007/BF00865981
6. Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(2), 135-151. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006
7. Ginestar, C., & Castel, J. R. (1995). Use of stem dendrometers as indicators of water stress in drip-irrigated citrus trees. *II International Symposium on Sensors in Horticulture*, *421*, 209-222. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.421.22
8. Heidari, M. D., Omid, M., & Mohammadi, A. (2012). Measuring productive efficiency of horticultural greenhouses in Iran: a data envelopment analysis approach. *Expert Systems with Applications*, *39*(1), 1040-1045. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.104
9. Kalankesh, L. R., Zazouli, M. A., Susanto, H., & Babanezhad, E. (2021). Variability of TOC and DBPs (THMs and HAA5) in drinking water sources and distribution system in drought season: the North Iran case study. *Environmental Technology*, *42*(1), 100-113. https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1621952
10. Kováčová, M., Bárek, V., & Kišš, V. (2020). Dendrmetric changee as water stress indicator for sunflower (*Helianthus annus* L.) and maize (*Zea mays* L.)- Basic research in laboratory conditions. Acta Sci. Pol. Form. *Circumiectus*, *19*, 77-85. https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2020.19.2.77
11. Marshall, D. C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, *33*(6), 385. https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385
12. Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, *47*(12), 1833-1844. https://doi.org/10.1093/jxb/47.12.1833
13. Uddin, J., Smith, R., Hancock, N., & Foley, J. (2014). Evaluation of sap flow sensors to measure the transpiration rate of plants during canopy wetting and drying. *Journal of Agricultural Studies*, *2*(2), 105-119. https://doi.org/10.5296/jas.v2i2.6134